Proceedings of 5º Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, IEEE, October 19-20, 1999, Montevideo, Uruguay

Modelo de regulador de tensión para simulaciones dinámicas, asistidas por computadora

Alvaro Musetti Perna
Gcia. de Planificación de la explotación y estudios, UTE
Montevideo, Uruguay

Resumen: El presente trabajo plantea la realización de un modelo de regulador automático de tensión (R.A.T.), para ser usado en simulaciones dinámicas y cálculos de estabilidad, ejecutados por computadora. Luego de encontrar un modelo adecuado, se programó el mismo, al no ajustarse a los modelos estándar de los programas disponibles. Finalmente, se contrastaron simulaciones con los ensayos de visto bueno, realizados por la empresa contratista encargada de la instalación del equipo. Luego de investigar las condiciones en que fueron hechos los ensayos y de ciertos ajustes en el modelo, se llegaron a resultados satisfactorios.

Palabras clave: Sistemas de excitación, regulador de tensión, regulador de voltaje, regulación, excitación, simulaciones dinámicas, estabilidad, simulaciones en sistemas de potencia.

I. INTRODUCCIÓN

El sistema de excitación estudiado es estático. Posee dos rectificadores de 6 tiristores cada uno, que pueden funcionar en paralelo o uno por vez. En la figura 1 se presenta un diagrama de bloques estableciendo las partes que se modelaron [1].

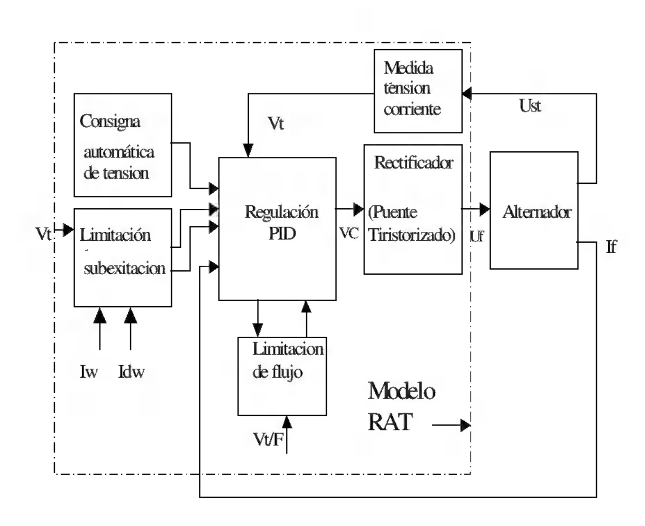


Fig. 1 – Diagrama de bloques del sistema de excitación

El sistema de regulación tiene principalmente tres funciones elaboradas por tarjetas electrónicas:

- Regulación PID (Proporcional – integral – derivada)
- Limitación de sub – excitación
- Limitación de flujo magnético

La tarjeta de regulación PID, incluye además la función de limitación de corriente de campo.

II. DEFINICIONES Y MAGNITUDES

Las diferentes variables del modelo (variables de estado, entrada y salida), se han programado en por unidad. En la tabla 1, se detallan las mismas en sus respectivos valores BASE. Existen dos columnas de valores base:

- BASE 1 – valores de base de las magnitudes eléctricas del alternador y del voltaje de control (VC).
- BASE 2 – valores base de los voltajes de calibración, de las magnitudes anteriores, a nivel de las tarjetas electrónicas.

Tabla 1 – Valores base de las magnitudes.

Magnitud BASE	Valor BASE 1	Valor BASE 2 (V DC)	Descripción
Uf	110 V DC	-	Tensión de campo.
If	365 A/719 A	2.03/4.00	Corriente de campo[1]
Ust	13.8 kV AC	5.00	Tensión nom. De estator
Ist	1674 A	5.00	Corriente nom. de estator
Iw	1674 A	5.00	Componente activa de Ist
Idw	1674 A	5.00	Componente reactiva de Ist
VC	5 V	5.00	Tensiones de comando.
P, Q, S	40 MVA	-	Potencias
F	50 Hz	-	Frecuencia.

Con minúsculas se hará referencia a los valores en p.u. de estas magnitudes

III. REGULACION PID

Esta función se realiza por intermedio de la función derivada, establecida por el filtro de avance de fase (fig. 2), y el bloque P.I. (PI1). Tiene como señal de salida (VC), al comando de disparo del puente de tiristores.

[1] Se podrán usar en el modelo dos bases alternativas: la primera corresponde a la corriente de campo que produce una tensión de vacío en el alternador, de 1 p.u. considerando como función Ust(If) a la línea de entrehierro [5]. La segunda base alternativa, corresponde a la corriente de campo nominal (719 A).

La señal de entrada al filtro de avance de fase, se obtiene a partir de la señal de salida de la tarjeta limitadora de flujo, (que más adelante se detallará). El sumador principal S1 elabora la señal de error de entrada.

Otras señales de entrada al sumador S1, son:

- limitación de sub – excitación (V_u)
- estatismo de reactiva (V_{estat})
- consigna automática de tensión (Vref)

En el anexo de este artículo, se presenta un listado con los valores de las constantes que constituyen el modelo. Estos parámetros por lo general podrán ser ajustados [2].

Funcionamiento

Suponiendo que no hay limitación de flujo magnético, (i.e. no se supera el límite superior de flujo magnético), la salida de S1, se copia a la entrada del filtro de Av. de Fase. Cuando no hay limitación por sobre - corriente de excitación, la señal V_o es cero.

De este modo, el regulador tiene una transferencia P.I.D. clásica.

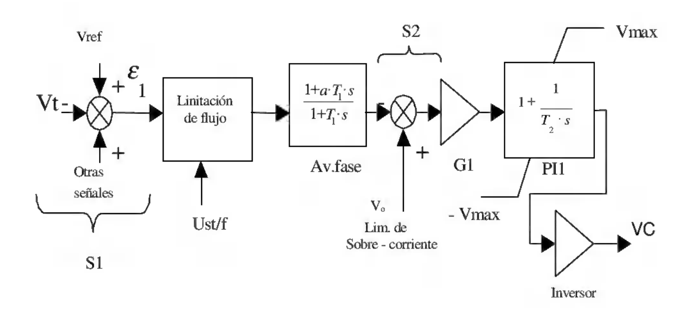


Fig. 2 – Regulación PID.

IV. LIMITACIÓN DE FLUJO MAGNÉTICO

Esta función la realiza una tarjeta que tiene por objetivo evitar la saturación del núcleo de hierro de la máquina. Rectifica y filtra una señal de entrada trifásica, para crear una señal continua proporcional al flujo magnético (u_{st}/f).

La relación u_{st}/f, se compara con un valor de referencia u_{st}/f ref (ajustable), obteniéndose la señal de error Δ (u_{st}/f). Este circuito actúa de manera de llevar el valor u_{st}/f al valor límite (u_{st}/f ref), si se intentara superar el mismo [2].

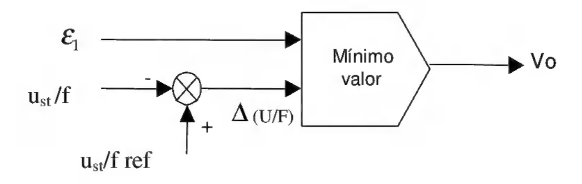


Fig. 3 – Limitación de flujo magnético

V. LIMITACIÓN DE SOBRE-EXCITACIÓN

Como anteriormente se dijo, la tarjeta de regulación incluye la función de limitación de corriente de excitación. Se realiza comparando la imagen de corriente (If), con una referencia (límite) If LIM (fig. 4).

Esta referencia límite (If LIM) puede ser permanente o transitoria.

La limitación transitoria (llamada autorización de tope[2]), dura 10 s. y está ajustada a un valor mayor que el límite permanente [2].

La diferencia entre la corriente de campo y su límite (ε_2), se inyecta a un circuito realimentado.

La señal de salida del circuito P.I. (PI2) y VC, generan un pulso cuando existe alguna variación, de modo que a la salida del integrador, se obtiene un escalón de voltaje.

De acuerdo a su signo, conducirá uno de los diodos rectificadores, representados por R1 y R2.

Normalmente, mientras no se supere el límite establecido de corriente de campo, se realimenta a través de R2, compensando la diferencia ε_2.

Si se supera el límite de corriente ($\varepsilon_2 < 0$), "conduce" R1 y se "corta" R2. V_o (salida de lím. de sobre – corriente), se resta a la señal de salida del filtro de Av. de fase, produciendo como consecuencia un decremento de la tensión de campo y una consecuente reducción de la corriente de campo.

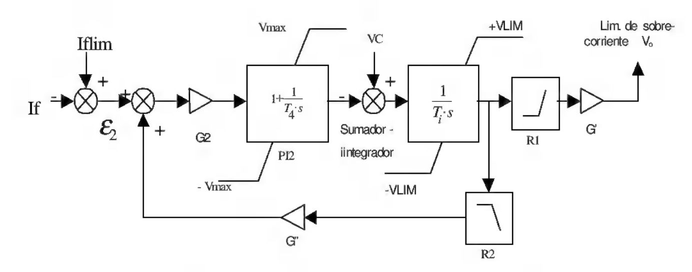


Fig. 4 – Limitación de sobre – excitación.

VI. LIMITACION DE SUB-EXCITACIÓN

Esta función la realiza una tarjeta cuyo voltaje de salida (V_u) se aplica al sumador S1 (fig. 5). Se pretende evitar la desexcitación del alternador al absorber potencia reactiva, y la pérdida de estabilidad.

---

[2] Un circuito lógico modifica transitoriamente el límite, cuando se produce un cambio brusco en la tensión de estator; cuando dUst/dt supera 25 V/s, o Ust cae por debajo de 0.8 p.u.

El límite permanente se modifica llevándolo al límite o "tope" de 1.6 p.u. (BASE 719 A) durante 10 s. Estos 10 s, son temporizados por un monoestable.

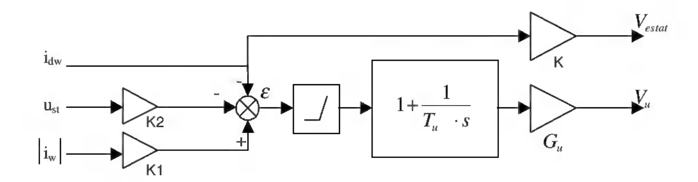


Fig. 5 – Modelo de limitación de sub - excitación

La tarjeta es capaz de elaborar una imagen de la componente de la corriente activa (I_w) y de la reactiva (I_{dw}) a partir de la corriente y tensión de estator. Posee un circuito de control del tipo PI. La salida provee una tensión positiva para aumentar la consigna de tensión de la tarjeta reguladora P.I.D. Cuando la señal de error ε (ecuación (1)) es mayor que cero, se supera el límite de estabilidad (ver el diagrama de cargabilidad de la máquina en fig. 6).

$$\varepsilon = |i_w| \cdot K1 - K2 \cdot u_{st} - i_{dw} . \qquad (1)$$

Donde $|i_w| = |i_{st}| \cdot \cos\varphi$, $|i_{dw}| = |i_{st}| \cdot \operatorname{sen}\varphi$ y φ es el desfasaje entre u_{st} e i_{st}.

La ecuación (1), con ε =0, representa la recta límite de estabilidad en el diagrama de cargabilidad de la máquina (puntos A[0 MW, -22 MVAr] y B[32 MW, -18 MVAr]), a tensión de estator nominal.

A los efectos de un ajuste, las ctes. K1 y K2, se calculan a partir de los valores P y Q de la recta límite de estabilidad, como sigue:

$$\text{K2} = -\frac{q}{u_{st}^2} , \qquad (2)$$

$$\text{K1} = \frac{q + K2 \cdot u_{st}^2}{p} . \qquad (3)$$

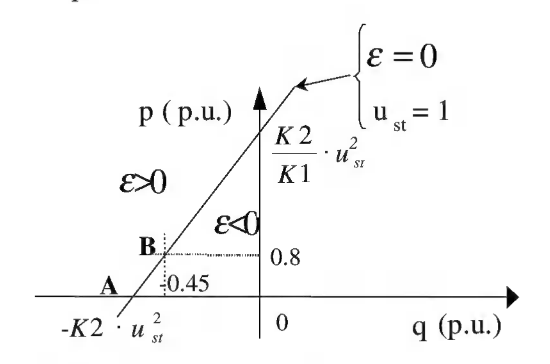


Fig. 6 – Diagrama p, q. Recta límite de estabilidad

Estatismo en reactiva

Esta tarjeta, tiene la posibilidad de elaborar una señal de estatismo en corriente reactiva. Se entiende como estatismo en la corriente reactiva, como la pendiente de la característica $U_{st}(Q)$. La señal de estatismo (V_{estat}), se aplica al sumador principal S1 y se añade a la tensión de consigna[3].

VII. RECTIFICACIÓN DE VOLTAJE

Este sistema de excitación, como se dijo, posee dos puentes de tiristores que funcionan en paralelo. Cada puente tiene seis tiristores (puente de 6 pulsos). La señal de disparo de los tiristores se elabora a partir de una tensión alterna hexafásica de referencia (Uref), y de la señal de salida del regulador (VC). El disparo es por arco-coseno, elaborado por la tarjeta generadora de impulsos.

En la figura 7 se muestra en forma esquemática la configuración del control del puente de tiristores. La tarjeta de filtrado, previamente acondiciona las señales para proporcionarlas a la tarjeta generadora de impulsos como referencia (Uref). Toma una tensión alterna trifásica a través de un transformador, y la convierte en un sistema de tensiones hexafásico.

Invierte la tensión de comando VC proveniente de la tarjeta de regulación P.I.D. Junto con la tarjeta generadora de impulsos, se produce la señal de disparo de los tiristores que teóricamente, tiene una excursión desde -10 Volts (pleno de rectificador, es decir, ángulo de disparo de 0°) a +10 V (pleno de ondulador, es decir ángulo de disparo de 180°).

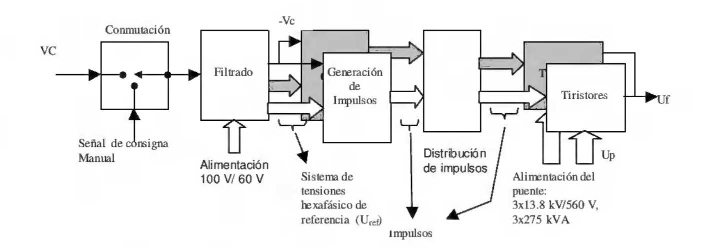


Fig.7 – Esquema del control del puente de tiristores.

Por último la tarjeta de conmutación, realiza la conmutación entre el modo manual y el automático. Luego se realiza la distribución de los pulsos a las compuertas de los tiristores, por intermedio de otra tarjeta electrónica. La salida del puente de tiristores (Uf), está rectificada a partir de la tensión proveniente del banco de transformadores monofásicos de excitación de 275 kVA, de relación 13.8/0.56 kV (c/banco).

Modelo adoptado

El modelo ha sido tomado (fig. 8) del modelo tipo ST1, según [6]. Se ha despreciado la constante de tiempo del

[3] El estatismo es ajustable, o podrá inhabilitarse (K = 0).

puente (T_A)[4] por ser muy pequeña comparada con los pasos de integración del programa utilizado.

También ha sido implementada una reducción de ganancia transitoria, y fue ajustada de acuerdo a sugerencias de sintonización publicadas en [12][5]. La tensión de campo está limitada por topes proporcionales a la tensión de estator Ust. Las características de este puente rectificador hacen que la corriente de campo no pueda invertirse de polaridad. Así, se aplica al modelo del alternador una tensión EFD > 0.

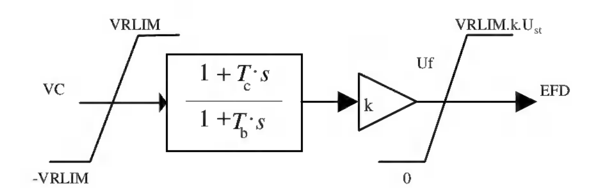


Fig. 8 – Modelo de puente rectificador de tiristores

VIII. ENSAYOS

A los efectos de contrastar y ajustar el modelo, se programó el mismo en PSS/E (Power System Simulator), y se simularon los ensayos de puesta en servicio de una de las máquinas. Se programo el modelo de regulador aquí propuesto, y como modelos de regulador de velocidad y de alternador, se usaron modelos de las bibliotecas estándar del programa ajustando sus constantes a las de la máquina real. Estos son:

- Escalón en la consigna de +/- 0.02 pu
- Rechazo de carga
- Cebado de la máquina
- Verificación de límites.

En el presente artículo se muestran los resultados de las simulaciones de 1 2 y 4, a modo ilustrativo.

Escalón de consigna

En las figuras 9 y 10 se presentan las curvas de respuesta a un escalón positivo de 0.02 pu, del ensayo y de la simulación respectivamente. En el ensayo la máquina estaba suministrando 38 MW y –1 MVAr inicialmente. El esquema unifilar de la red utilizada en la simulación en las condiciones iniciales está en la fig. 13. En el ensayo, se inyectó un escalón de 100 mV (2%), a un borne accesible de la tarjeta, que permite sumar esta tensión a la consigna automática. Los resultados de algunos puntos singulares de ambas curvas se comparan en la tabla 2. El tiempo de establecimiento Ts, es el tiempo que tarda la magnitud en mantenerse dentro de una franja de +/- 5% del valor final [13].

Tabla 2 – Simulación de la respuesta a un escalón del 2%

		Ensayo	Simulación
Ust (kV)	V inicio	13.20	13.20
	V fin.	13.41	13.43
	V pico	13.50	13.45
	T s (s) [6]	1< Ts <2	0.85
VC (V)	V inicio	2.50	2.31
	V fin.	2.75	2.45
	V pico	3.50	3.25
	T p (ms) [7]	40	3.1
If (A)	V inicio	515	507
	V fin.	563	537
	V pico	565	538
	T s (s) [8]	> 3.6	1.4

Rechazo de carga

Se simuló el ensayo de rechazo de carga con la misma red usada en la fig. 13, pero con la máquina 2 fuera de servicio. Además las condiciones iniciales de carga fueron de 39 MW, 22 MVAr. En las fig. 11 y 12 se pueden ver los resultados del ensayo y la simulación respectivamente. La característica de la corriente de campo en función del tiempo, es dependiente de la frecuencia [11]. Por lo tanto fue necesario contemplar la acción del regulador de velocidad. El modelo de regulador usado fue obtenido de la biblioteca de modelos Standard del PSS para realizar la simulación. Este modelo no es exactamente igual al que poseen las máquinas ensayadas. Se calcularon sus parámetros, de modo que la respuesta de la velocidad de la máquina, se aproxime a la real. En la tabla 3, se presentan los valores inicial, final y valores de pico de las magnitudes medidas, y de la simulación. Se toma como tiempo de referencia, el tiempo de retorno (T ret) al 1% de la tensión final, especificado en el ensayo.

Tabla 3 – Simulación de rechazo de carga

		Ensayo	Simulación
Ust(kV)	V inicio	14.1	14.1
	V fin.	14.5	14.4
	V pico	16.3	16.3
	T ret (s)	1.36	2.64
VC (V)	V inicio	4	3.8
	V fin.	2	2.1
	V pico	-2.4	-3.2
If (A)	V inicio	855	837
	V fin.	333	347
	V pico	316	329

4 Según notación empleada en el articulo de referencia.

5 Luego de realizar simulaciones con diferentes valores de T_c y T_b, se observó que la performance del regulador que más se ajustaba a la real, se dió para T_c=T_b.

6 El error de apreciación del gráfico es muy elevado; es de casi +/- 50 % del incremento final de tensión.

7 Se opto por tomar el tiempo en que se produce el pico (Tp) debido al error de apreciación elevado que existe en los datos.

8 El error de apreciación es del orden de +/- 15 % en el ensayo.

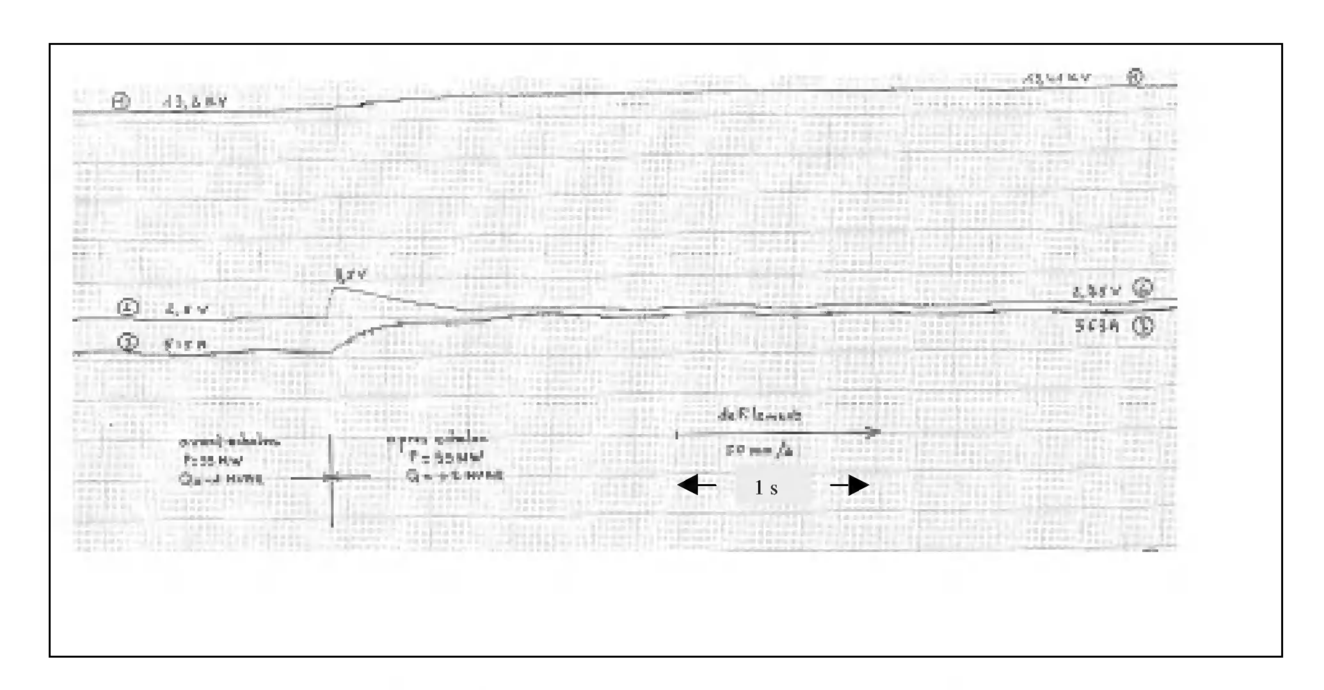


Fig. 9 – Ensayo de puesta en servicio: respuesta a un escalón del 2%

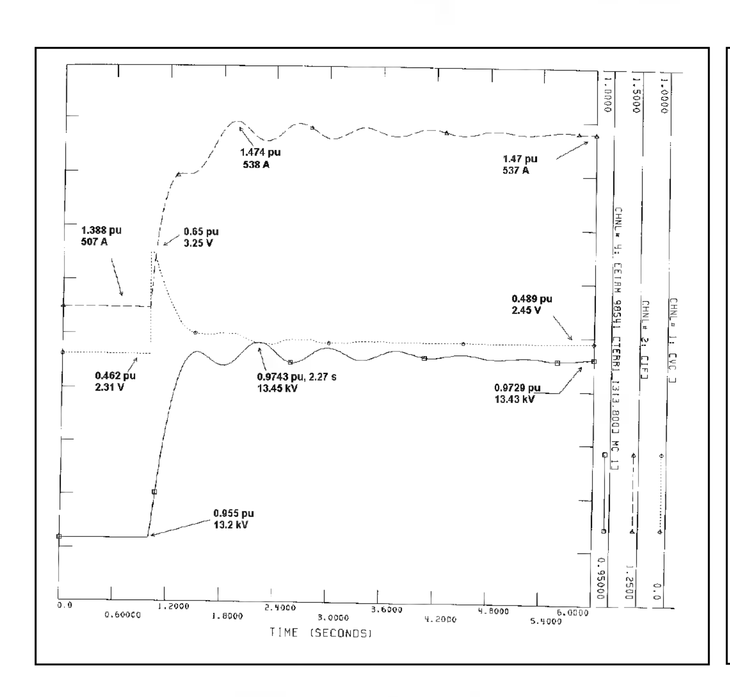


Fig 10 – Simulación de la respuesta al escalón del 2%

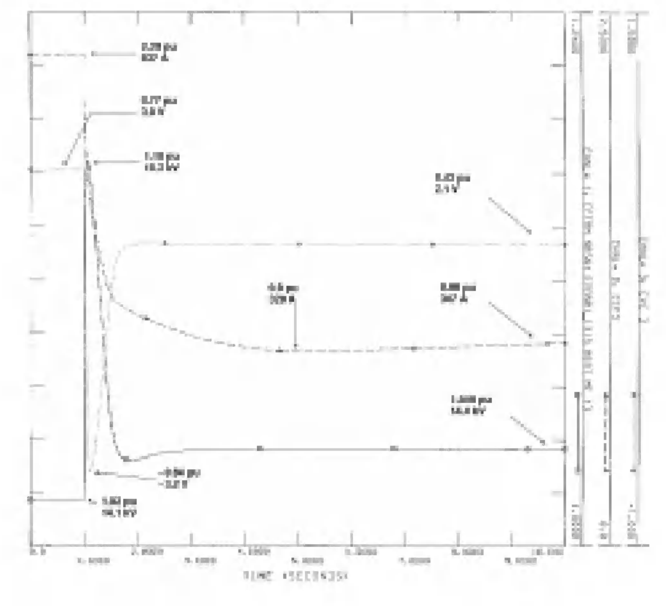


Fig 11 – Simulación del rechazo de carga

Verificación de límites



Los limites verificados fueron:

- Límite de sub - excitación
- Límite de sobre - excitación
- Límite de flujo

En los informes de los ensayos que se dispone, se encuentran las condiciones en que se realizaron los ensayos de actuación de las limitaciones. Se realizaron las simulaciones en PSS, con iguales resultados de actuación de las variables de limitación, dadas las mismas condiciones iniciales de la máquina en servicio.

El límite de sub – excitación, se alcanzó en dos puntos de funcionamiento: para 12.4 kV, 5 MW, -21 MVAr y 12.4 kV,

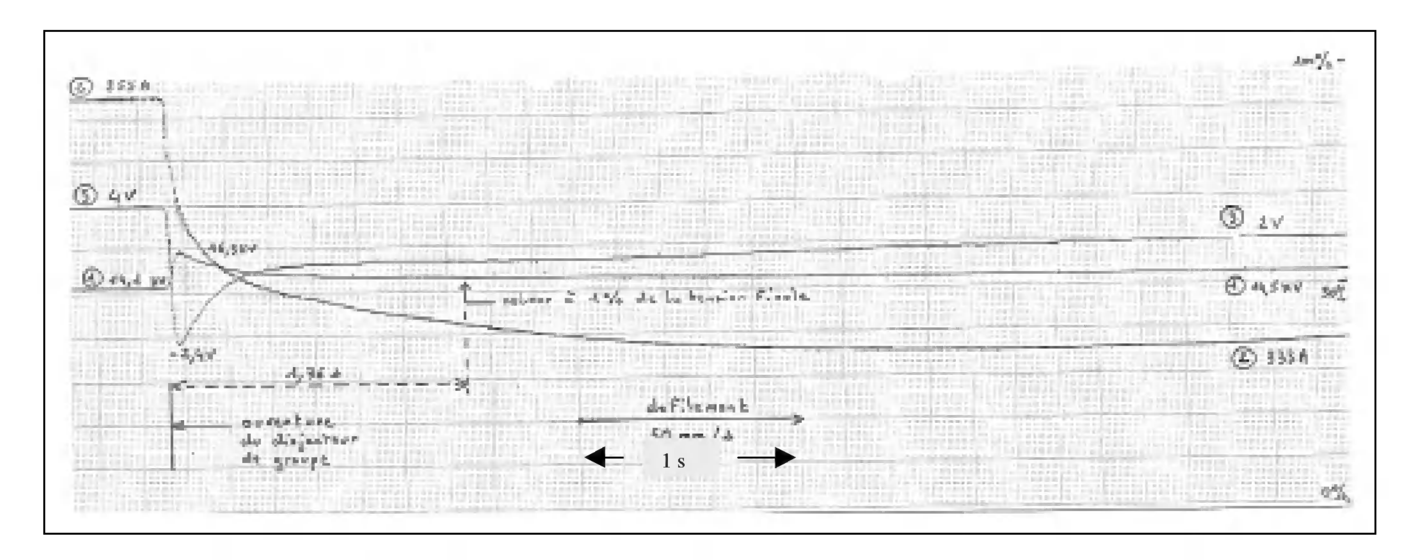


Fig. 12 – Ensayo de puesta en servicio: Rechazo de carga de 38 MW, 22 MVAr

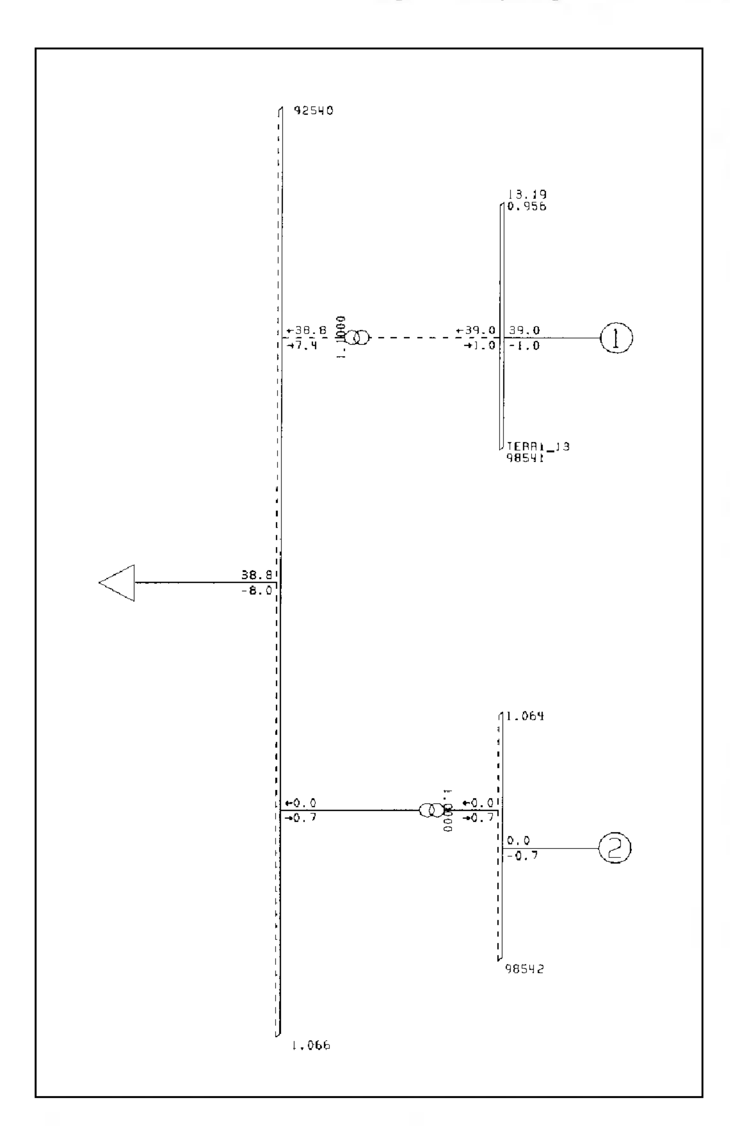


Fig 13 – Configuración usada en la simulación de respuesta al escalón

30 MW y –14 MVAr. La señal de salida *Vu*, se comprobó que es >0.

El límite de sobre - excitación se alcanzó con la máquina suministrando 30 MW, 25 MVAr a 14.6 kV. La señal Vo >0 y la corriente de campo (If, que inicialmente es mayor a If lim.), es llevada a su límite establecido (2.36 p.u.).

La limitación de flujo magnético se realizo de la siguiente manera: En el ensayo real que se dispone, el límite ust / f fue disminuido a 5.2 V (1.04 p.u.), teniendo la máquina generando a una tensión de 14,43 kV (1.045 p.u.) y a una frecuencia de 50 .03 Hz (1 p.u.). Se midió que ust / f = 5.22 V (1.044 p.u.). Entonces se deduce que limita al valor impuesto. La simulación se realizó partiendo del límite fijo en 5.5 V (1.1 p.u.). Luego de un segundo, se llevó el valor de ust/f ref., a 5.2 V (1.04 pu). Se observó que después de un transitorio, la tensión de estator evoluciona al valor límite (1.04 p.u.).

IX. CONCLUSIONES

Las variables más importantes a tener en cuenta en los estudios de estabilidad y transitorios, son la tensión de estator (U_{st}) y el tiempo de respuesta a una perturbación. Desde este punto de vista, observando la tensión de estator, en el contraste realizado, se puede concluir que (teniendo en cuenta la respuesta al escalón de tensión), el modelo del regulador es "más rápido" que el real (0.85 s en la simulación y del orden de 1 s en el ensayo), pero estos tiempos están muy próximos. Del mismo modo, sucede con los valores de la tensión (tabla 2), en que el error entre tensiones obtenido no supera al 1 %. Respecto al rechazo de carga se obtuvo que la tensión es "más lenta" (2.64 s en la simulación contra 1.36 s en el ensayo), debido a un sobretiro que se manifiesta, y a la influencia del regulador de velocidad. Este sobretiro (que hace al modelo tendiente a estar más sub - amortiguado que el sistema real), también se ha manifestado en el ensayo de cebado (que no se describió en este artículo). En cuanto a la

actuación de las limitaciones, el modelo responde satisfactoriamente. Si bien queda pendiente un ajuste ulterior de las constantes para adecuar mejor aún la respuesta , se ha optado por utilizar este modelo de todos modos para simulaciones dinámicas, dando resultados razonables y satisfactorios.

X. RECONOCIMIENTOS

El autor desea agradecer la participación fundamental del Ing. Pablo Thomasset por el aporte de material, conocimientos y experiencia de campo en la central, al Ing. Eduardo Penza por los aportes de material, su experiencia profesional en simulaciones dinámicas y, sobretodo, por la actitud positiva de dirección y de constante apoyo para la realización de investigaciones y desarrollos de este tipo.

También cabe destacar la colaboración del Ing. David Bonjour por los aportes de conocimientos del manejo y programación del PSS/E. Sin la participación de estas personas hubiese sido imposible la realización del trabajo.

XI. ANEXO

Se listan a continuación los valores de las constantes empleadas:

T	0.02 s	Cte. de tiempo de medida de tensión
T_1	0.0264 s	Cte de tiempo de Avance de fase
a	1	Eficiencia del av. de fase.
G_1	10	Ganancia PI1
T_2	1 s	Cte. de tiempo PI1
Vmax	1.5 pu	Límite de saturación de PI1 y PI2
Vrlim	2 pu	Limite de saturación del puente de tiristores
k	3	Ganancia del puente de tiristores
If lim	2.36 pu	Limite permanente de corriente de campo[9]
G_2	4	Ganancia de corriente de campo
G”	3.33	Ganancia del lazo de realimentación
T_4	1 s	Cte. de tiempo de PI2
T_i	1 ms	Cte. de tiempo del sumador – integrador
G’	2.15	Ganancia de la salida de limitación de sobre – corriente de excitación
V lim	2.4 pu	Límite de saturación del sumador – integrador.
K1	0.125	Factor de Iw
K2	0.55	Factor de Idw
T_u	0.55 s	Cte, de tiempo de limitación de sub – excitación
G_u	0.1	Ganancia de limitación de sub – excitación
U/f ref	1.1 pu	Limite de flujo
K	-0.045 pu	Estatismo en reactiva.
T_c	0.04 s	Cte. De tiempo lead – lag de la rectificación
T_b	0.04 s	Cte. De tiempo lead – lag de la rectificación

XII. REFERENCIAS

[1] European Gas Turbines, “Guía de explotación y de mantenimiento”, setiembre 1993.

[2] European Gas Turbienes, “Reporte de fin de fabricación”, enero 1995.

[3] Kjeld Thorborg , “Power Electronics”, 1988 Prentice Hall International (UK) Ltd.

[4] Hansruedi Bühler, “Electrónica Industrial, Electrónica de regulación y control".

[5] IEEE committee report, “Proposed excitation system definitions for synchronous machines”, IEEE trans. on power apparatus and systems, Vol. Pas-88, No. 8, August 1969.

[6] IEEE commitee report, “Excitation systems models for power system stability studies”, IEEE transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100 No. 2, feb. 1981.

[7] Power Technologies, Inc., “Program Operation Manual” Volume I, PSS/E-24.

[8] Power Technologies, Inc., “Program Application guide” Volume II, PSS/E-24.

[9] Power Technologies, Inc., “Program Operation Manual” Volume II, PSS/E-24.

[10] Power Technologies, Inc., “ PSS/E on the PC for Windows NT / Windows 95” , Manual PSSE/E - 24

[11] Alberto Carlos Alvarez y colaboradores, “La máquina sincrónica en los sistemas de Potencia”, Fondo editorial IACRE, Buenos Aires Argentina, 1982.

[12] Rodolfo J. Koessler, “Techniques for tuning excitation system parameters”, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol 3, No. 4, December 1988.

[13] Katsuhiko Ogata, “ Ingeniería de control moderna”, 1980 Editorial Dossat S.A. Plaza de Santa Ana, 9 – Madrid – 12 (España),pag. 250



XIII. BIOGRAFIA



Alvaro Musetti Perna nació en Montevideo, Uruguay, el 3 de abril de 1965. Se graduó de Ingeniero Electricista en la facultad de Ingeniería de Montevideo.

Su experiencia laboral, a sido obtenida en U.T.E. (Usinas y transmisiones eléctricas). Trabajó especializándose, principalmente, en el mantenimiento de cables subterráneos y en la temática relacionada al análisis y localización de faltas en redes subterráneas de distribución de energía eléctrica entre los años 1990 y 1997. A partir de 1998 comenzó a trabajar como ingeniero especialista en estudios dinámicos del sistema eléctrico nacional, cargo que actualmente desempeña.

[9] Si la base considerada es If base = 719 A, If lim = 1.2 pu.